

Article de recherche

Les kiosques à eau solaires peuvent-ils générer des flux de revenus durables pour les services d'eau en milieu rural ?

Johannes Wagner^{a,b,*}, Sara Merner^a, Stefania Innocenti^{a,b}, Alinta Geling^c, Rob Hope^{a,b}

^a School of Geography and the Environment, University of Oxford, Oxford OX1 3QY, UK

^b Smith School of Enterprise and the Environment, University of Oxford, Oxford OX1 3QY, UK

^c UDUMA Mali S.A., Sotuba ACI, Bamako, Mali

RESUME

Mots-clés :

Eau potable
Kiosques solaires
Viabilité financière
Comportements de paiement
Rural Mali

L'approvisionnement durable en eau potable dans les zones rurales d'Afrique dépend de revenus provenant des paiements des usagers pour maintenir les services. Alors que les pompes manuelles ont été la principale source d'eau potable pour les Africains ruraux pendant des décennies, la génération de revenus locaux a été instable, contribuant à des interruptions de service. Nous examinons l'effet de la conversion de pompes manuelles vers des kiosques solaires au Mali entre 2019 à 2023. Nous modélisons 452 données mensuelles observées de paiement et de volume d'eau pour estimer les changements dans la consommation d'eau et la génération de revenus. Les revenus moyens ont quadruplé, indiquant une meilleure performance financière avec les kiosques solaires. En revanche, nous ne constatons pas d'augmentation significative du volume d'eau utilisé lorsqu'une pompe à main est transformée en kiosque solaire. Nous estimons qu'une augmentation de la température de 1 °C est associée à une augmentation de 9 \$ du revenu mensuel moyen et à 366 litres d'eau supplémentaires utilisés chaque jour par point d'eau. Notre étude suggère que les habitants ruraux du Mali sont plus enclins à payer pour de l'eau fournie par des kiosques solaires gérés de manière professionnelle. Toutefois, la volatilité saisonnière de la demande en eau et l'incertitude sur les effets de revenu à long terme soulignent que les kiosques solaires ne constituent pas une solution définitive aux comportements dynamiques des usagers d'eau en Afrique rurale.

1. Introduction

Le défi mondial consistant à fournir des services d'eau potable gérés en toute sécurité à deux milliards de personnes (WHO et al., 2022) est exacerbé en Afrique rurale, où environ 25 à 30 % des points d'eau ne sont pas fonctionnels à un moment donné (Foster et al., 2020). De plus, les risques climatiques et les extrêmes météorologiques, tels que la variabilité accrue des précipitations et les sécheresses et vagues de chaleur prolongées, mettent davantage sous pression la qualité et la quantité de l'approvisionnement en eau (IPCC, 2022; WHO et al., 2022). Dans ce contexte, de nouvelles technologies d'approvisionnement en eau et des modèles de gestion émergent pour fournir des services fiables et résilients au climat (Hope et al., 2020; Howard et al., 2016; Macdonald et al., 2009).

Dans le cadre des Objectifs de Développement Durable, visant à fournir de l'eau potable fiable, accessible et sûre aux communautés rurales (UNGA, 2015), les kiosques solaires à eau gagnent du terrain en Afrique. Ces kiosques utilisent de l'énergie renouvelable pour pomper les ressources en eau souterraine largement disponibles (MacDonald et al., 2021; Meunier et al., 2023). En comparaison avec les pompes manuelles, les kiosques requièrent moins d'effort physique pour pomper l'eau, fournissent de l'eau à la demande via des robinets et permettent de réduire le temps d'attente (Kiprono & Llarío,

2020; World Bank, 2018), ce qui est particulièrement bénéfique pour les femmes et les enfants qui passent environ 200 millions d'heures chaque jour à collecter de l'eau (Graham et al., 2016). Cependant, malgré les avantages du pompage solaire, de l'entretien et de la maintenance sont toujours nécessaires pour garantir la continuité des services (Chandel et al., 2015; Foster et al., 2020).

Des modèles de prestation de services professionnels ont émergé en Afrique pour assurer la durabilité opérationnelle des investissements dans les infrastructures d'eau en milieu rural (Nilsson et al., 2021). Ces modèles parviennent généralement à réparer les infrastructures d'eau rurales défectueuses en trois jours ou moins, une amélioration par rapport aux semaines ou mois que les communautés prennent souvent pour effectuer des telles réparations. Malgré cette meilleure performance opérationnelle, les modèles de prestation de services professionnels génèrent rarement des revenus suffisants via les paiements des usagers pour être financièrement viables (Foster et al., 2022; Smith et al., 2023). Les déficits de revenus sont plus prononcés pour les pompes manuelles (McNicholl et al., 2019) qui restent la technologie d'approvisionnement en eau la plus utilisée en Afrique rurale (Foster, 2013; Foster et al., 2020).

Des études au Kenya (Koehler et al., 2021) et en Ouganda (Smith et al., 2023) ont examiné si les services de maintenance professionnels

* Corresponding author.

E-mail address: johannes.wagner@ouce.ox.ac.uk (J. Wagner).

pour les pompes manuelles, offrant des réponses rapides aux pannes, augmentaient la génération de revenus. Les deux études constatent que les paiements des utilisateurs restent limités et diminuent au fil du temps. À la lumière de ces résultats, Smith et al. appellent à des analyses empiriques sur les réponses des usagers relatives aux améliorations des services, "en utilisant de vrais paiements sur des périodes de temps significativement longues" (2023, p. 13).

L'analyse des réponses des usagers à des améliorations hypothétiques des services d'eau potable suggèrent que les revenus générés par les paiements des usagers sont susceptibles d'être plus élevés et plus réguliers pour des ménages bénéficiant de branchements d'eau individuels (Mu et al., 1990; Van Houtven et al., 2017). Alors que l'approvisionnement en eau par conduites se développe lentement dans les zones rurales (Armstrong, 2022; WHO et al., 2022), les kiosques solaires offrent une amélioration du niveau de service par rapport aux pompes manuelles, éliminant ainsi la nécessité de pomper manuellement. Cependant, il n'est pas clair comment le passage des pompes manuelles aux kiosques solaires affecte l'utilisation de l'eau, les comportements de paiement et la génération de revenus. Cet article cherche à combler cette lacune en évaluant empiriquement les effets d'une amélioration d'infrastructure dans un cadre réel.

Au Mali, UDUMA, une société professionnelle de prestation de services, a levé des capitaux privés et publics pour mettre en place des contrats gouvernementaux visant à fournir des services d'eau fiables en milieu rural, sous réserve de paiements par les utilisateurs (van der Wilk, 2019). Lorsque la conception initiale du programme est passée de la gestion des pompes manuelles à l'expérimentation des kiosques solaires, une opportunité est apparue pour évaluer cette transition dans 15 communautés rurales. Des données régulièrement collectées sur la production volumétrique d'eau et les paiements des utilisateurs sont disponibles avant et après le changement d'infrastructure dans le cadre de l'approche de gestion professionnelle d'UDUMA. Nous suivons les changements dus à l'introduction de la technologie solaire par rapport aux données historiques des pompes manuelles et évaluons dans quelle mesure les kiosques solaires affectent l'utilisation de l'eau et la génération de revenus, en tenant compte des fluctuations saisonnières.

Nous suivons trois indicateurs de performance au niveau des points d'eau au cours de trois saisons sèches et humides consécutives : le volume quotidien moyen d'eau utilisé, les collectes de paiements mensuels et les revenus mensuels. Notre analyse couvre 452 mois de données de performance des points d'eau sur la période allant de novembre 2019 à avril 2023, dans un total de 15 sites qui sont passés de pompes manuelles à kiosques solaires. Notre stratégie analytique applique des séries chronologiques interrompues (*interrupted time series*) et des modèles de régression à effets fixes (*fixed effects regression*) pour estimer l'effet de la mise à niveau technologique sur les résultats d'intérêt. Nous menons des tests statistiques supplémentaires pour vérifier la robustesse de l'analyse.

Notre analyse a des implications pour les politiques et les pratiques intéressées par la prestation efficace de services d'eau en milieu rural. Nous constatons que, bien que la demande des utilisateurs reste soumise à des flux saisonniers, les kiosques solaires génèrent en moyenne des revenus mensuels quatre fois plus élevés que les pompes manuelles. Notre étude suggère que les habitants des zones rurales du Mali sont plus enclins à payer pour l'eau qu'ils consomment lorsqu'elle est fournie de manière professionnelle par des kiosques solaires. Avec des milliards de dollars de financements d'adaptation susceptibles d'émerger dans les années à venir (UNEP, 2022), il pourrait être judicieux d'investir dans les kiosques solaires étant donné leur meilleure performance financière. Cependant, la volatilité saisonnière de la demande en eau et l'incertitude quant à l'effet des revenus à long terme mettent en garde de considérer les kiosques solaires comme une solution définitive aux comportements spécifiques et dynamiques des utilisateurs d'eau en Afrique rurale.

2. Matériels and méthodes

2.1. Contexte de l'étude et sélection des sites

L'étude se situe dans la Région de Sikasso, au sud du Mali. La zone est caractérisée par une saison sèche annuelle allant de mars à juin, suivie d'une saison des pluies de juillet à octobre, avec des précipitations annuelles comprises entre 510 et 1 400 mm et des températures moyennes de 24 à 32°C (World Food Programme, 2021). La situation sociopolitique et sécuritaire du Mali est volatile, Sikasso étant la région avec la plus forte incidence de pauvreté (INSTAT, 2019). L'étude utilise des données de la société privée UDUMA, qui fournit des services d'eau fiables en milieu rural dans 30 municipalités rurales, le niveau administratif le plus bas du Mali (van der Wilk, 2019).

UDUMA installe et entretient des points d'eau ruraux équipés de compteurs d'eau. Les modalités de paiement, les niveaux de service et les tarifs volumétriques sont formellement établis dans un contrat de gestion signé entre UDUMA et les autorités locales. UDUMA est responsable des services d'entretien, garantissant la fiabilité des services avec des durées d'interruption inférieures à 72 heures, et effectue régulièrement des contrôles de qualité de l'eau (UDUMA, 2017). Dans le cadre du contrat, les utilisateurs doivent payer un tarif volumétrique de 500 FCFA (0,80 \$) par m³, conformément à la politique tarifaire du Mali pour l'approvisionnement en eau en milieu rural (DNH, 2007). L'approche de paiement au volume exige que les utilisateurs effectuent des paiements directs au point d'eau pour chaque contenant collecté.

Entre mars et mai 2021, UDUMA a progressivement converti les forages équipés de pompes manuelles (UDUMA gère deux types de pompes : India Mark 2 et Vergnet-Hydro) en kiosques solaires sur dix sites (cohorte 1). En décembre 2021, un groupe supplémentaire de cinq points d'eau sous la gestion d'UDUMA a reçu une mise à niveau identique de pompe manuelle à kiosque solaire (cohorte 2). Le changement de l'infrastructure (Fig. 1) dans les 15 localités a été introduit dans le cadre de contrats existants. Ce changement dans la stratégie initiale d'UDUMA, passant de la gestion des pompes manuelles à la mise en œuvre de kiosques solaires, a été motivé par une génération de revenus instable et une faible utilisation de l'eau avec les pompes manuelles. Les entités gouvernementales nationales et régionales au Mali ont soutenu l'orientation d'UDUMA vers l'installation de kiosques solaires.

Le passage d'une pompe manuelle à un kiosque solaire a réduit l'effort physique nécessaire pour pomper, le temps nécessaire pour remplir un seau de 20 litres et le temps d'attente grâce aux trois robinets et à un débit plus élevé. Si le niveau tarifaire, le mode de paiement au volume (PAYF), la qualité du service, la distance entre le ménage des usagers et le point d'eau, ainsi que le contexte socio-culturel restent inchangés, un niveau de service supérieur est offert. Tableau 1 résume les principales différences et similitudes entre les types d'infrastructures et les niveaux de service associés.

UDUMA a sélectionné les sites (Fig. 2), reflétant la diversité des conditions géographiques, socio-économiques et environnementales de sa zone de service, pour tester les kiosques solaires (des informations supplémentaires se trouvent dans le Tableau S1, Informations Complémentaires, SI). La sélection des sites par l'opérateur a été guidée par les critères suivants : contexte sociopolitique et situation sécuritaire locale, conditions environnementales (débit du forage et test de pompe) et taille de la population (minimum 700 personnes par village), avec une population distincte de service par point d'eau inconnue. Nous soulignons qu'UDUMA a ciblé des sites ayant un potentiel de succès. Les conditions d'installation d'un kiosque solaire ne sont donc pas aléatoires et l'étude ne repose pas sur une expérience formelle. Cependant, nous utilisons les deux cohortes de points d'eau comme une opportunité d'explorer les effets d'une amélioration en infrastructure sur le comportement des usagers.



Fig. 1. Types d'infrastructure gérés par UDUMA : pompe à pied, pompe à main, kiosque solaire.

Tableau 1

Comparaison des attributs de service entre les types d'infrastructure.

Attribut	Pompe manuelle	Kiosque solaire
Tarif par m ³ (volume)	500 FCFA / \$0.80	500 FCFA / \$0.80
Fiabilité du service	Réparation de pannes en max. 3 jours	Réparation de pannes en max. 3 jours
Suivi de la qualité de l'eau	Oui	Oui
Effort physique pour remplir un seau de 20L	60–80 coups de pompe	Pas d'effort physique requis
Temps estimé pour remplir un seau de 20L	Environ 2 min	Moins 1 min
Sorties de distribution	1 bec	3 robinets

Notes: Les données sur les performances de l'infrastructure sont basées sur des observations de terrain.

Enfin, nous soulignons qu'au cours d'une période de quatre mois, d'octobre 2021 à janvier 2022, UDUMA a remplacé son système de paiement digital initial par un système de paiement en espèces. Le système numérique initial exigeait que les utilisateurs créditent une carte de paiement. Au point d'eau, les utilisateurs payaient pour le volume d'eau collecté en utilisant leur carte et un lecteur de carte manipulé par le fontainier. La carte de paiement était débitée en fonction du volume d'eau collecté, avec un tarif volumétrique de 500 FCFA (0,80 \$) par m³. Depuis janvier 2022, tous les paiements sont effectués en espèces, selon le même tarif (0,80 \$/m³) et la même modalité de paiement que le système de paiement numérique initial. Pour les paiements en espèces, les utilisateurs paient directement en espèces le montant volumétrique requis au fontainier.

Le passage du paiement mobile au paiement en espèces a été motivé par des considérations de coût, étant donné les coûts opérationnels élevés des systèmes de paiement numérique (licence de logiciel, appareils de collecte de données, frais pour le prestataire de paiement numérique, etc.). Bien que ce changement de système de paiement ait entraîné des modifications internes au niveau du prestataire, l'expérience utilisateur n'a pas fondamentalement changé. Avant, pendant et après la transition du paiement numérique au paiement en espèces, les utilisateurs continuaient à effectuer des paiements directs au fontainier du point d'eau. Nous insistons sur le fait que la transition progressive du paiement numérique au paiement en espèces n'a pas affecté le niveau tarifaire (\$0.80/m³) ni la modalité de paiement au volume.

2.2. Collecte des données et définition des variables

Dans le cadre de l'approche de gestion professionnelle d'UDUMA, les données sur l'utilisation de l'eau et les paiements par point d'eau sont collectées chaque mois. Comme chaque point d'eau possède un code d'identification unique, les relevés mensuels de consommation d'eau et les données de paiement peuvent être liés.

Les relevés des compteurs volumétriques sont effectués pour chaque point d'eau par le personnel de terrain d'UDUMA. Les responsables de zone visitent les points d'eau respectifs et effectuent les relevés en fin de mois. Ils enregistrent l'index du compteur à l'aide d'un outil de collecte de données mobiles (Kizeo), en scannant le code QR unique du point d'eau, en entrant le relevé du compteur et en prenant une photo du compteur. Ces données sont horodatées et stockées en ligne. La fiabilité des données des compteurs est contrôlée et validée par les superviseurs basés à Bougouni.

Pour les données de paiement, la méthode de collecte diffère selon que les paiements sont effectués numériquement ou en espèces. Le système initial de paiement numérique numérisait directement la transaction et transférait les revenus à UDUMA. Pour les paiements en espèce, les responsables de zone collectent les recettes en espèce auprès du fontainier de chaque point d'eau lors de leur visite mensuelle. Les responsables de zone enregistrent les recettes en espèces générées à chaque point d'eau et les envoient sur un compte bancaire local en utilisant un service de paiement mobile (Orange money).

L'utilisation de l'eau est mesurée en volume quotidien moyen utilisé par point d'eau au cours d'un mois, tandis que les indicateurs liés aux revenus comportent le taux de collecte des paiements (taux de recouvrement) et le revenu mensuel par point d'eau. Nous évaluons ces indicateurs avant et après le changement d'infrastructure. Le volume quotidien moyen est calculé pour chaque point d'eau en divisant le

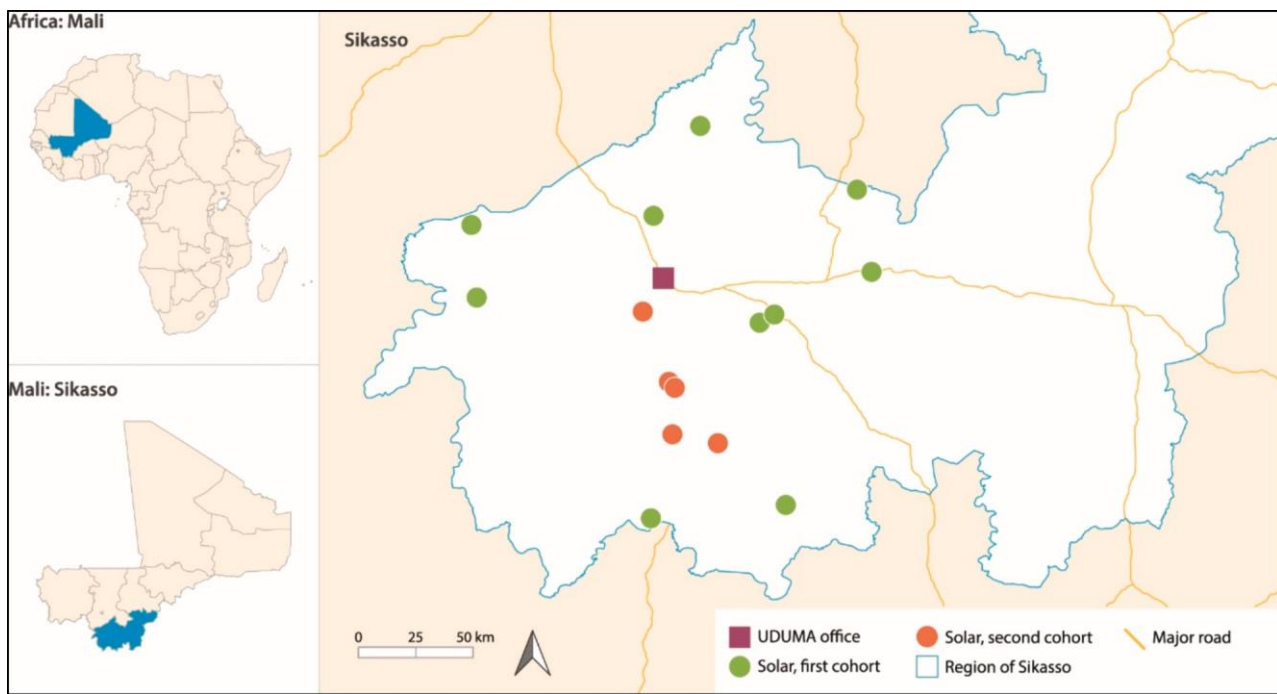


Fig. 2. Carte des sites de l'étude à Sikasso, Mali. 15 localités, séparées en deux cohortes ayant reçu un kiosque solaire

volume mensuel d'eau utilisé par le nombre de jours du mois concerné. Le taux de recouvrement représente le ratio du volume d'eau payé par rapport au volume d'eau facturé dans le mois par point d'eau. Le revenu mensuel par point d'eau est basé sur les enregistrements des ventes d'UDUMA et est rapporté en dollars américains. Ces indicateurs de performance fournissent des aperçus sur l'utilisation réelle d'un point d'eau et peuvent être considérés comme un indicateur de la valeur que les utilisateurs attribuent au service (Hope et al., 2020).

Pour la première cohorte de dix points d'eau, un total de 323 enregistrements mensuels sur l'utilisation de l'eau et les paiements est disponible de novembre 2019 à avril 2023. Cela inclut 98 mois de données avant la mise à niveau solaire et 225 mois de données après le changement d'infrastructure. Le changement d'infrastructure s'est effectué progressivement entre mars et mai 2021, suivant une adoption échelonnée (Cunningham, 2021), avec des dates variables pour chacun des dix sites.

La deuxième cohorte de cinq points d'eau sous la gestion d'UDUMA a reçu une mise à niveau d'infrastructure passant d'une pompe manuelle à un kiosque solaire le 1er décembre 2021, ce qui constitue un point de coupure clair. Les données de paiement et les enregistrements d'utilisation volumétrique couvrent un total de 129 observations mensuelles de mars 2021 à avril 2023, avec 44 mois de données avant et 85 mois de données après la mise à niveau solaire.

Reconnaissant que les conditions climatiques changeantes, notamment les précipitations saisonnières et la température, peuvent influencer la demande des utilisateurs (Armstrong et al., 2021; MacAllister et al., 2020; Thomas et al., 2019; Thomson et al., 2019), les estimations empiriques tiennent compte de la quantité totale de précipitations dans le mois et de la température moyenne mensuelle pour chaque site. Les données de précipitations ont été récupérées auprès de Tropical Applications of Meteorology utilisant des données satellitaires et des observations au sol, TAMSAT (Maidment et al., 2014; 2017; Tarnavsky et al., 2014), tandis que les estimations de température ont été générées à l'aide des informations du Copernicus Climate Change Service (Copernicus Climate Change Service, 2019).

Avant la collecte et l'analyse des données, une approbation éthique a été obtenue auprès du Comité d'éthique de la recherche de l'université de l'auteur principal.

2.3. Empirical strategy and statistical models

Pour estimer l'effet des améliorations d'infrastructure sur les trois résultats d'intérêt, nous exploitons la mise à niveau de l'infrastructure à une période spécifique et utilisons la disponibilité de données longitudinales sur les paiements observés et l'utilisation de l'eau mesurée. La principale variable indépendante, la mise à niveau de l'infrastructure, est codée comme une variable binaire distinguant une pompe manuelle (0) et un kiosque solaire (1) dans les données de panel, avec un point de coupure défini par la date à laquelle le point d'eau a été amélioré.

Afin de tenir compte de l'adoption progressive et de définir la période d'intervention, si la mise à niveau s'est produite après le 15e jour du mois, le mois est classé comme une période de pompe manuelle (binaire = 0). Les mises à niveau qui se sont produites dans la seconde moitié du mois sont codées comme solaires uniquement dans le mois suivant (binaire = 1). Étant donné que les opérations des points d'eau identifiés ont commencé à des périodes différentes, le jeu de données en panel est déséquilibré.

Nos estimations reposent sur une analyse des séries chronologiques interrompues (interrupted time series, ITS) qui nous permet d'évaluer si la transition d'une pompe manuelle à un kiosque solaire influence le niveau et la tendance des résultats. De plus, l'analyse ITS tient compte de l'autocorrélation des variables dépendantes, ce qui fournit une estimation plus précise de l'effet longitudinal du changement d'infrastructure (Kontopantelis et al., 2015; Linden, 2015; Lopez Bernal et al., 2016; Penfold & Zhang, 2013). Une conception ITS ne nécessite pas que l'intervention soit introduite "du jour au lendemain" (Lopez Bernal et al., 2016), mais il doit y avoir une période d'intervention clairement définie. Dans le cas de la première cohorte de dix points d'eau, la période d'intervention se situe entre mars et mai 2021, et pour la deuxième cohorte de cinq points d'eau, la période d'intervention est le 1er décembre 2021, un point limite clair (plus de détails sur la période d'intervention dans la section 2, SI).

Les résultats du modèle ITS émergent de la spécification économétrique suivante :

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1(\text{time}) + \beta_2(\text{intervention}_t) + \beta_3(\text{timeafterintervention}_t) + \varepsilon_t$$

Où Y_t est le résultat d'intérêt, β_0 estime le niveau de base du résultat, β_1 estime la tendance du résultat mensuel moyen avant l'intervention avec une unité de temps augmentée, β_2 estime le changement de niveau après l'intervention et β_3 le changement de pente après l'intervention, en utilisant l'interaction entre le temps et l'intervention.

Des modèles plus complets incluent les précipitations mensuelles et les températures pour tenir compte des facteurs saisonniers susceptibles d'affecter les variables dépendantes. Lorsque les conditions climatiques sont contrôlées, les tests de modèle (ACF, PACF, et Durbin Watson) indiquent des améliorations de l'autocorrélation. Les graphiques ITS (Freyaldenhoven et al., 2021; Penfold & Zhang, 2013) montrent les changements de niveaux et de tendances pour les résultats (Section 2.2, SI pour plus de détail).

Pour vérifier la cohérence des résultats de la conception ITS, nous effectuons également des estimations de régression à effets fixes pour l'ensemble des données de panel afin d'évaluer l'effet de la mise à niveau de l'infrastructure sur les trois résultats d'intérêt. Nos estimations reposent sur le modèle d'effets fixes suivant :

$$Y_{t,i} = \beta_0 + \beta_1(\text{time}_{t,i}) + \beta_2(\text{intervention}_{t,i}) + \beta_3(\text{timeafterintervention}_{t,i}) + \alpha + \varepsilon_{it}$$

Où $Y_{t,i}$ est le résultat d'intérêt pour le point d'eau i à un moment donné t , β_0 estime le niveau de base du résultat, β_1 estime la tendance du résultat mensuel avant l'intervention, β_2 estime le changement de niveau après l'intervention, β_3 le changement de pente après l'intervention, et α est l'effet fixe unitaire pour chaque point d'eau individuel i . l'intervention, et α est l'effet fixe unitaire pour chaque point d'eau individuel i .

Les modèles à effets fixes permettent la présence de corrélations arbitraires entre les effets individuels non observés et les covariables, et contrôlent ces facteurs non observables pour atténuer le biais d'omission de variables (Best & Wolf, 2014; Cunningham, 2021; Wooldridge, 2010). Nous contrôlons les variables confondantes variant dans le temps (précipitations et température) et incluons un effet fixe au niveau du point d'eau (l'ID unique du point d'eau est utilisé comme intercept fixe) pour éviter les biais d'omission de variables. Nous utilisons des erreurs standard robustes, groupées au niveau du point d'eau, pour tenir compte de l'autocorrélation qui survient entre les périodes dans chaque unité (Abadie et al., 2022; Cameron & Miller, 2015). Les résultats de l'estimation de la régression à effets fixes sont rapportés dans le Tableau S3, SI.

Pour examiner plus en profondeur les résultats de l'analyse ITS de la première cohorte, nous appliquons le modèle ITS aux données de la deuxième cohorte de cinq points d'eau qui ont bénéficié de la mise à niveau de la pompe manuelle au kiosque solaire en décembre 2021. Cette approche nous permet de comparer l'effet de la mise à niveau solaire sur les résultats d'intérêt entre deux cohortes de points d'eau distinctes, ce qui permet d'évaluer la cohérence et la divergence des modèles empiriques selon les contextes.

Un dernier contrôle consiste à tenir compte de la saisonnalité pendant la période d'intervention de la première cohorte de dix points d'eau en regroupant les données par période temporelle durant laquelle les points d'eau individuels ont reçu la mise à niveau d'infrastructure (Schochet, 2022). Le regroupement basé sur les périodes temporelles permet une approche plus détaillée et permet de vérifier s'il existe des changements différents dans les coefficients en fonction du moment de l'intervention (les résultats sont rapportés dans le Tableau S4, SI). Toutes les analyses statistiques ont été réalisées dans R (Version 4.0.3).

3. Résultats

Nous présentons les statistiques descriptives pour la première cohorte de dix points d'eau et les résultats des modèles ITS pour les deux cohortes de points d'eau afin d'illustrer la cohérence et les divergences entre les contextes. Les statistiques descriptives de la deuxième cohorte de points d'eau, ainsi que les résultats des tests de robustesse (modèle de régression à effets fixes et modèle ITS tenant compte de la saisonnalité pendant la période d'intervention) se trouvent dans les informations supplémentaires (SI) et sont référencés dans le manuscrit si nécessaire.

3.1. L'utilisation de l'eau n'est pas affectée par la mise à niveau de l'infrastructure, mais elle est soumise à une variation saisonnière

Un suivi longitudinal sur trois saisons sèches et humides consécutives révèle des variations saisonnières dans l'utilisation quotidienne de l'eau qui affectent les deux types d'infrastructures, avec des variations importantes d'utilisation selon les sites (Fig. 3). Les augmentations de niveaux d'utilisation quotidienne coïncident avec la saison chaude au Mali (de mars à juin), tandis que la demande en eau diminue pendant la saison des pluies (de juillet à octobre). Bien que nous observions une augmentation moyenne inconditionnelle du volume quotidien utilisé lorsqu'une pompe manuelle (moyenne : 1,36 m³, médiane : 0,88 m³) est remplacée par un kiosque solaire (moyenne : 1,84 m³, médiane : 0,94 m³), nos analyses indiquent que ce changement n'est pas significatif significatif (Tableau 2, and Tableaux S3 et S4 in SI).

Tableau 2 présente les résultats des modèles de régression ITS pour les deux cohortes de points d'eau. L'approche ITS permet de modéliser le changement d'ampleur qui se produit en conséquence de l'intervention, mesuré par la différence des résultats immédiatement avant et après la mise à niveau solaire (changement de niveau). De plus, nos modèles ITS fournissent une estimation du changement de pente avant et après l'intervention (changement de tendance). Comme les diagnostics pertinents pour l'ajustement du modèle (R^2 et R^2 ajusté) s'améliorent lorsque les facteurs saisonniers sont contrôlés, nous ne décrivons que les modèles avec contrôles.

En tenant compte de la température et des précipitations, les résultats ne montrent pas de changement significatif de niveau ou de tendance après la transition d'une pompe manuelle à un kiosque solaire (Tableau 2). Le modèle 2 indique que, pour la première cohorte de dix points d'eau, seule la température mensuelle est significativement associée à une augmentation de l'utilisation de l'eau. Une augmentation de 1°C de la température moyenne mensuelle entraîne une abstraction quotidienne supplémentaire de 366 litres par point d'eau. Un graphique ITS visualise ce résultat (Figure S2, SI). Les estimations pour la deuxième cohorte de cinq points d'eau montrent un schéma similaire, la température étant significativement associée à une augmentation de l'utilisation quotidienne de 352 litres par point d'eau (Modèle 4).

Les estimations ITS rapportées sont cohérentes avec les modèles de régression à effets fixes (Tableau S3, SI). Enfin, nous ne trouvons aucun effet de la mise à niveau de l'infrastructure sur l'utilisation quotidienne de l'eau lorsque la saisonnalité est prise en compte pendant la période d'intervention (Table S4, SI). Nos modèles de régression et les tests de robustesse indiquent que l'utilisation quotidienne de l'eau par point d'eau n'augmente pas de manière significative lorsque les pompes manuelles sont converties en kiosques solaires. Toutefois, l'utilisation de l'eau dépend des conditions climatiques, suggérant que des températures mensuelles plus élevées entraînent une demande en eau accrue.

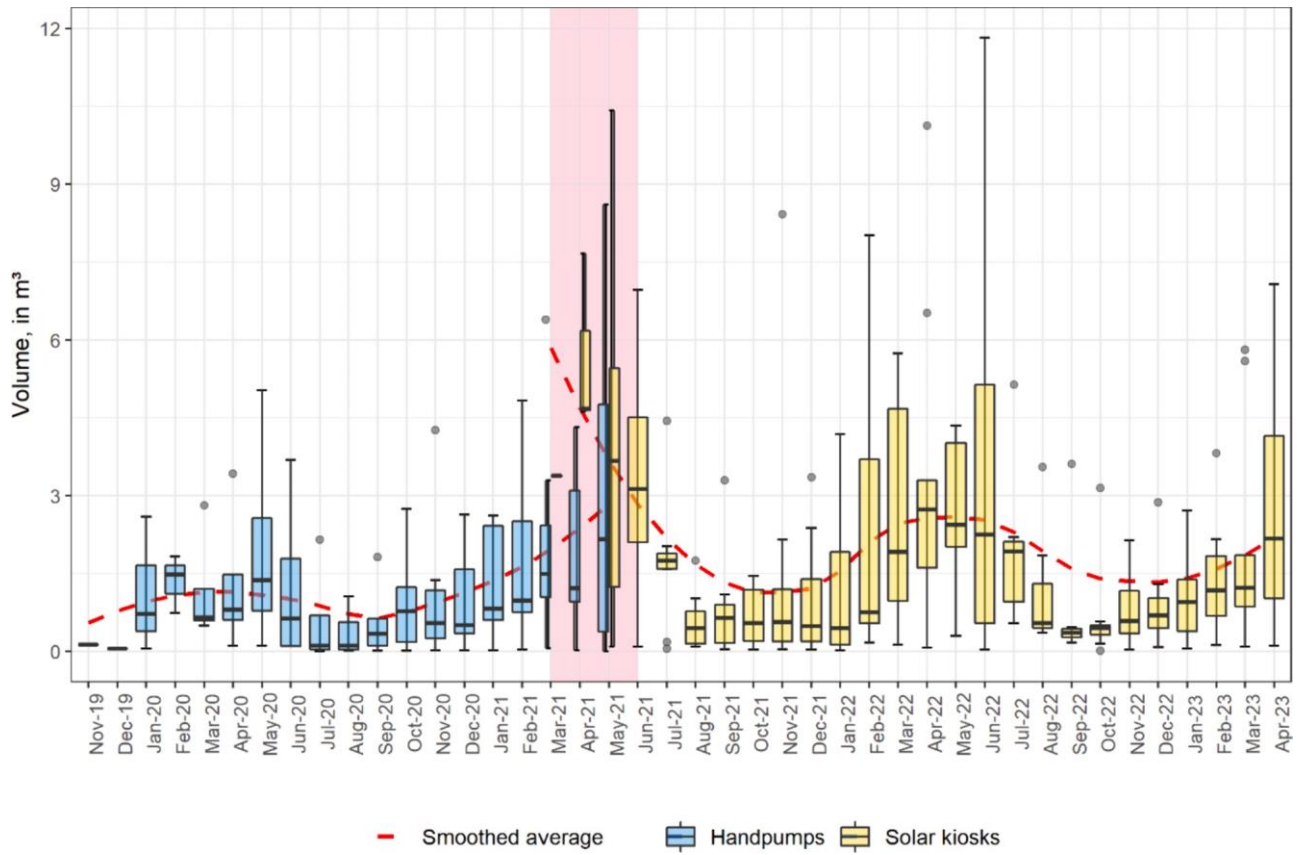


Fig. 3. Utilisation volumétrique quotidienne de l'eau au fil du temps. Diagrammes en boîte et à moustaches (écart interquartile et valeurs aberrantes) à travers les 10 points d'eau de la première cohorte sur l'utilisation volumétrique quotidienne, en séparant les types d'infrastructure. La ligne pointillée affiche la moyenne. La zone ombragée met en évidence la période de transition de l'infrastructure (de mars à mai 2021).

Tableau 2

Résultats de régression ITS pour l'utilisation volumétrique quotidienne (m³) pour les deux cohortes.

	1ère cohorte (10 points d'eau)		2ème cohorte (5 points d'eau)	
	(1) Basique	(2) Avec contrôles	(3) Basique	(4) Avec contrôles
Changement de niveau	-0.259(0.473)	0.383(0.430)	-0.295 (0.973)	-1.016 (0.658)
Changement de tendance	0.234*** (0.06)	0.032(0.084)	0.062 (0.183)	-0.197 (0.149)
Température		0.366*** (0.046)		0.353*** (0.056)
Observations Pluie	29	29 0.003*(0.001)	26	26
R ²	0.063	0.624	0.155	0.702
R ² adjusted	-0.049	0.542	0.040	0.628

Notes: Les erreurs standards robustes, regroupées au niveau du point d'eau, sont rapportées entre parenthèses. Niveaux de signification : * p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01. En gras pour un niveau de signification de 5 % et plus. Les contrôles incluent les précipitations mensuelles totales et la température moyenne mensuelle pour chacun des sites. Le changement de niveau fait référence à la variation de magnitude résultant de l'intervention, mesurée par la différence des résultats aux points temporels immédiatement avant et après la mise à niveau solaire, tandis que le changement de tendance se réfère à la variation de pente de la période pré-intervention à la période post-intervention.

3.2. Les revenus mensuels augmentent de quatre fois après l'introduction des kiosques solaires, mais ils sont soumis à des fluctuations saisonnières

Les statistiques descriptives révèlent que les revenus mensuels par point d'eau augmentent de plus de quatre fois lors du remplacement d'une pompe manuelle (moyenne : 11,69 \$, médiane : 7,85 \$) par un kiosque solaire (moyenne : 48,70 \$, médiane : 26,49 \$). Cependant, la variation est plus élevée pour les kiosques solaires (écart-type de 54,69 \$) par rapport aux pompes manuelles (écart-type de 12 \$), avec un revenu mensuel maximum de 267 \$.

Les revenus mensuels, tout comme la fluctuation saisonnière de la demande en eau, sont également affectés par les tendances saisonnières (Fig. 4). Les kiosques solaires connaissent des baisses de revenus pendant la saison des pluies, avec des diminutions moyennes atteignant 40 % par rapport aux revenus moyens annuels. En outre, il existe une grande variation entre les dix kiosques solaires, comme le montre la Fig. 4, soulignant que l'utilisation volumétrique de l'eau varie considérablement selon les sites, affectant les revenus mensuels.

Les résultats du modèle de régression ITS pour les deux cohortes de points d'eau indiquent que des changements significatifs et importants des revenus mensuels sont associés à l'introduction des kiosques solaires et à des températures plus élevées (Tableau 3). Pour la première cohorte, la mise à niveau de l'infrastructure est associée à une augmentation de revenus de 46 \$ par mois et par point d'eau, en tenant compte des facteurs saisonniers (Modèle 2). Un graphique ITS (Figure S2, SI) visualise le changement de niveaux de revenus.

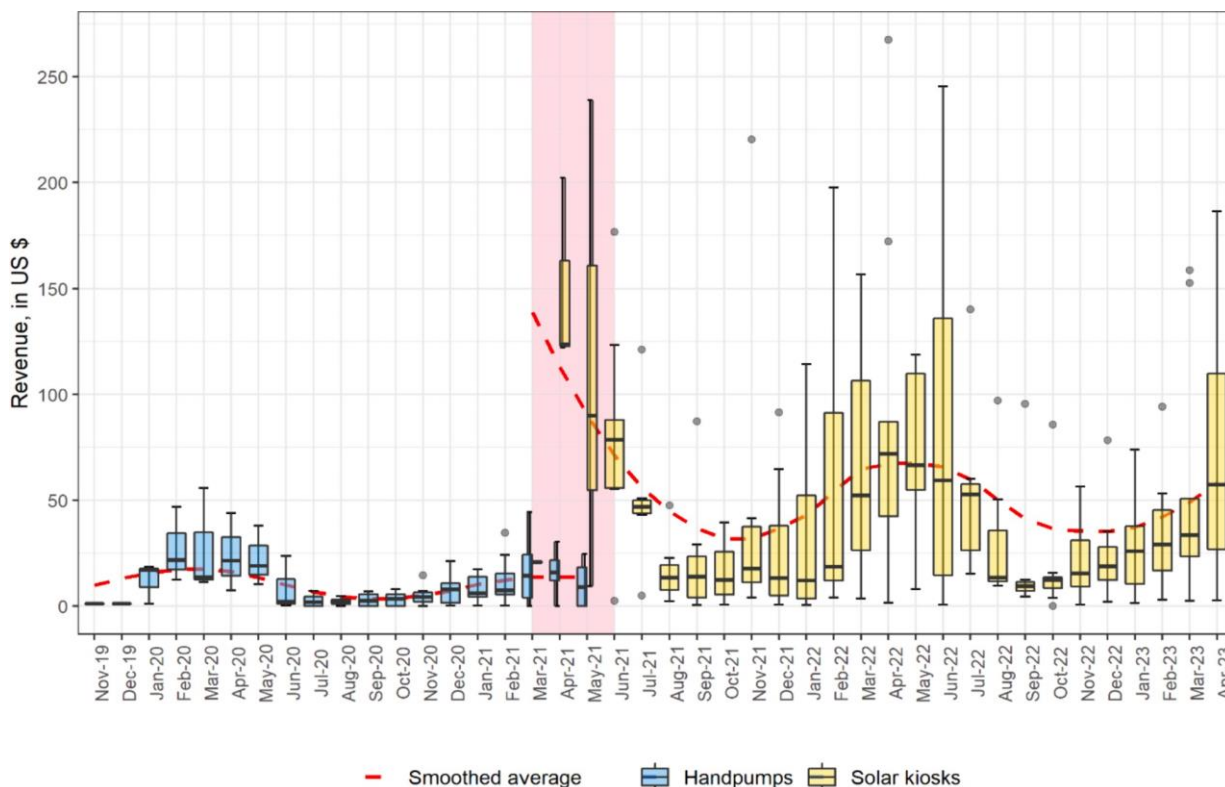


Fig. 4. Revenu mensuel au fil du temps. Diagrammes en boîte et à moustaches (écart interquartile et valeurs aberrantes) à travers les 10 points d'eau de la première cohorte sur l'utilisation volumétrique quotidienne, en séparant les types d'infrastructure. La ligne pointillée affiche la moyenne. La zone ombragée met en évidence la période de transition de l'infrastructure (de mars à mai 2021).

Tableau 3

ITS regression pour revenu mensuel (en \$).

	Première cohorte (10 points d'eau)		Deuxième cohorte (5 points d'eau)	
	(1) Basique	(2) Avec Contrôles	(3) De base	(4) Avec Contrôles
Changement de niveau	29,66 (11,39)	46.19(12.16)	45.65 (14.94)	31.46(10.68)
Changement de tendance	2.64 (0.88)	4.13 (2.78)	3.27 (2.02)	-2,18 (2.23)
Température		9.30*** (1.34)		7.56*** (1.57)
Pluie		0.07* (0.03)		0.03 (0.04)
Number of observations	29	29	26	26
R ²	0.310	0.729	0.382	0.781
R ² adjusted	0.227	0.670	0.297	0.726

Notes: Les erreurs standards robustes, regroupées au niveau du point d'eau, sont rapportées entre parenthèses. Niveaux de signification : * p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01. En gras pour un niveau de signification de 5 % et plus. Les contrôles incluent les précipitations mensuelles totales et la température moyenne mensuelle pour chacun des sites. Le changement de niveau fait référence à la variation de magnitude résultant de l'intervention, mesurée par la différence des résultats aux points temporels immédiatement avant et après la mise à niveau solaire, tandis que le changement de tendance se réfère à la variation de pente de la période pré-intervention à la période post-intervention.

De plus, les estimations indiquent qu'une augmentation de 1°C de la température moyenne mensuelle entraîne 9,30 \$ de revenus supplémentaires par point d'eau chaque mois, reflétant que les revenus augmentent avec la demande d'eau pendant la saison sèche annuelle. Les résultats pour la deuxième cohorte de points d'eau sont similaires (Tableau 3).

3.3. Le taux de recouvrement augmente considérablement après le changement d'infrastructure et reste stable au fil du temps et à travers les contextes

L'introduction des kiosques solaires est associée à un changement net dans la collecte des paiements. Les données descriptives indiquent qu'après qu'une pompe manuelle a été mise à niveau en kiosque solaire, le taux de recouvrement augmente en moyenne à 97 % (médiane : 100 %), alors que les ratios de paiement moyens avant la mise à niveau étaient inférieurs (moyenne : 40 %, médiane : 30 %). Fig. 5 illustre l'ampleur de ce changement dans le taux de recouvrement, qui est à la fois significatif et soudain, avec un timing correspondant à la mise à niveau solaire.

Ce changement dans le taux de recouvrement entre les types d'infrastructure nécessite une contextualisation supplémentaire en raison de ses implications pour les revenus mensuels. Le taux de recouvrement pour les pompes manuelles a connu une tendance à la baisse continue depuis mars 2020, avec une forte diminution en août 2020, atteignant un seuil stable d'environ 25 % depuis octobre 2020. Les utilisateurs au Mali montrent une volonté limitée de payer un tarif volumétrique pour l'utilisation de pompes manuelles, même si celles-ci sont gérées de manière fiable.

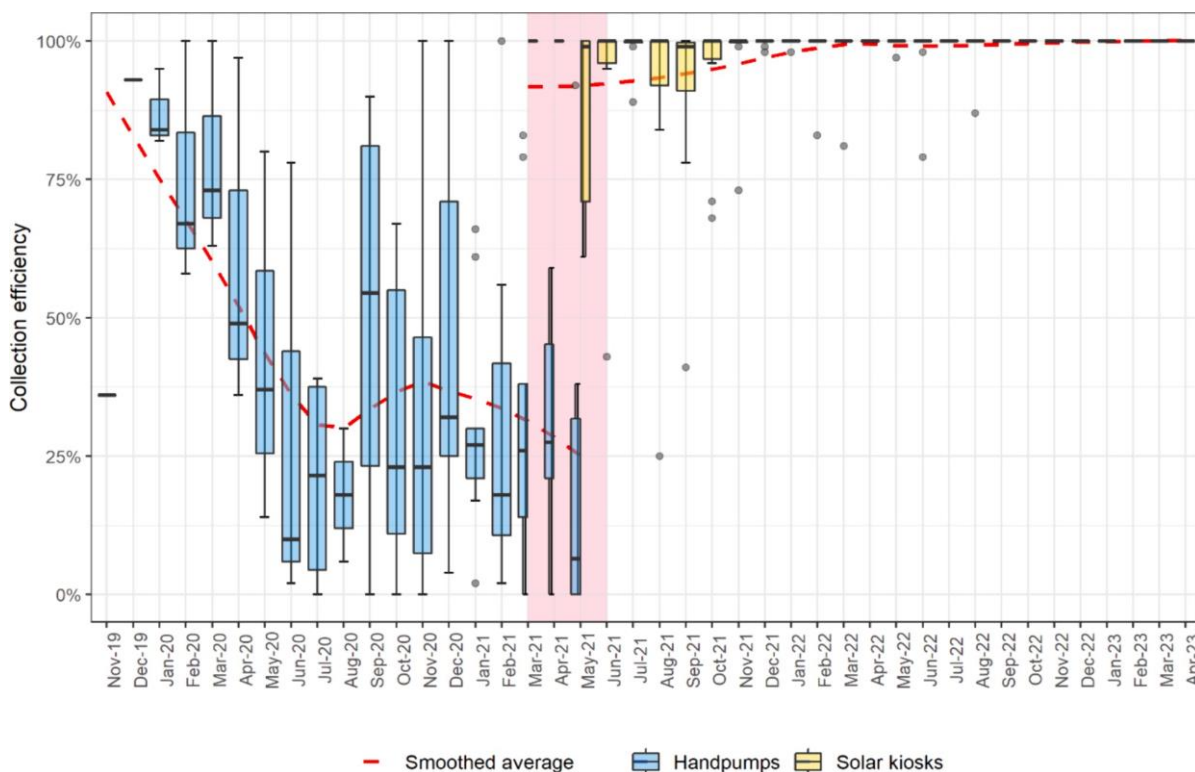


Fig. 5. Taux de recouvrement au fil du temps. Diagrammes en boîte et à moustaches (écart interquartile et valeurs aberrantes) à travers les 10 points d'eau de la première cohorte sur l'utilisation volumétrique quotidienne, en séparant les types d'infrastructure. La ligne pointillée affiche la moyenne. La zone ombragée met en évidence la période de transition de l'infrastructure (de mars à mai 2021).

Ce résultat pourrait être influencé par divers facteurs externes. Par exemple, la COVID-19 a eu un impact sur le Mali, le gouvernement national déclarant un état d'urgence sanitaire le 26 mars 2020. Un coup d'État de l'armée malienne le 18 août 2020 a encore déstabilisé l'économie fragile du Mali, contribuant à la récession économique liée à la pandémie (World Bank, 2021). Un second coup d'État le 24 mai 2021 et un embargo de la CEDEAO depuis janvier 2022 ont encore accru la pression économique sur le Mali. De plus, la France a retiré ses troupes du Mali en septembre 2022 et a suspendu son aide au développement à partir de novembre 2022. Ces facteurs peuvent avoir affecté les moyens de subsistance et, par conséquent, la capacité des utilisateurs à payer. Pourtant, ces chocs socio-économiques ne semblent pas avoir eu d'impact sur les paiements aux kiosques solaires, car leur tendance reste stable au fil du temps (Fig. 5 et Fig. S2, SI).

Les résultats de la régression ITS pour les deux cohortes de points d'eau soutiennent les perspectives descriptives (Tableau 4). Après la mise à niveau vers des kiosques solaires, le niveau des collectes de paiements augmente significativement de 62,7 % pour la première cohorte de points d'eau. En contrôlant les facteurs saisonniers, il n'y a pas de changement significatif dans la tendance du taux de recouvrement après la mise à niveau solaire, montrant ainsi une cohérence au fil du temps (Modèle 2).

La deuxième cohorte enregistre un modèle similaire, avec un effet plus important sur le taux de recouvrement (Modèle 4). Contrairement à l'utilisation volumétrique et aux revenus mensuels, les résultats pour les deux cohortes révèlent que le taux de recouvrement reste insensible aux facteurs saisonniers, les contrôles de température et de pluie n'étant pas significatifs (Tableau 4). Enfin, les résultats concernant le taux de recouvrement sont cohérents lorsqu'on modélise les données à travers une régression à effets fixes (Tableau S3, SI).

Dans l'ensemble, nos résultats sont conformes à d'autres études indiquant que l'application de paiements volumétriques est difficile lorsque les utilisateurs doivent investir du temps et des efforts physiques pour pomper de l'eau (Foster, 2017; Foster et al., 2020; Jones, 2013; Katuva et al., 2016). Cependant, les tarifs volumétriques dans les kiosques solaires sont plus facilement payés, comme l'indique le changement de niveau dans le taux de recouvrement suivi d'une tendance stable avec peu de variation au sein du mois.

4. Discussion

Les études empiriques de recherche appliquée peuvent aider à informer les changements de politique et de pratique (Jury & Vaux, 2005; Koehler et al., 2022) pour atteindre et maintenir la fourniture universelle d'eau potable dans les zones rurales d'Afrique. Trois conclusions de cette étude peuvent enrichir la compréhension de la manière dont les infrastructures et les modèles de prestation de services peuvent contribuer à des approvisionnements en eau rurale plus résilients et durables.

Tableau 4

ITS pour taux de recouvrement (en %) pour les deux cohortes.

	1ère cohorte (10 points d'eau)		2ème cohorte (5 points d'eau)	
	(1) Basic	(2) Avec contrôles	(3) Basic	(4) Contrôles
Changement de niveau	61.10***(2.2)	62.70***(1.8)	97.30***(3.40)	98.20***(2.90)
Changement de tendance	0.6(0.6)	0.6 (0.6)	4.80***(0.7)	5.1*** (0.9)
Température		-0.00 (0.000)		-0.5 (0.7)
Pluie		-0.1 (0.2)		0.0 (0.0)
Nombre d'observations	29	29	26	26
R ²	0.990	0.991	0.987	0.987
R ² adjusted	0.988	0.989	0.985	0.984

Notes: Les erreurs standards robustes, regroupées au niveau du point d'eau, sont rapportées entre parenthèses. Niveaux de signification : * p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01. Les contrôles incluent les précipitations mensuelles totales et la température moyenne mensuelle pour chacun des sites. Le changement de niveau fait référence à la variation de magnitude résultant de l'intervention, mesurée par la différence des résultats aux points temporels immédiatement avant et après la mise à niveau solaire, tandis que le changement de tendance se réfère à la variation de pente de la période pré-intervention à la période post-intervention.

Premièrement, l'augmentation des températures influence la consommation d'eau potable, avec des implications pour les investissements dans les infrastructures et la prestation de services. Deuxièmement, le financement durable des services d'eau potable nécessite de comprendre l'utilisation de l'eau et les comportements de paiement. Troisièmement, les prestataires de services professionnels peuvent garantir que les investissements dans les approvisionnements en eau potable rurale génèrent de la valeur dans la durée.

Nos résultats révèlent que, bien que les kiosques solaires réduisent l'effort physique pour collecter de l'eau par rapport aux pompes manuelles, les niveaux moyens d'utilisation de l'eau restent relativement similaires entre les deux types d'infrastructures. À première vue, il s'agit d'une conclusion contre-intuitive compte tenu du niveau de service supérieur. Cependant, même si les gens n'ont plus besoin de pomper pour accéder à l'eau, les kiosques solaires ne diminuent pas la distance jusqu'à l'habitat. Les utilisateurs – en particulier les femmes et les filles – doivent toujours marcher jusqu'à la source et porter l'eau jusqu'à chez eux, ce qui limite logiquement l'utilisation de l'eau au niveau des ménages (Thompson et al., 2001; White et al., 1972). De plus, le niveau et la structure des tarifs pourraient également influencer le comportement des utilisateurs. Une étude au Kenya a révélé que les tarifs volumétriques réduisent l'utilisation de l'eau parmi les groupes à faible revenu (Foster & Hope, 2017). Nous suggérons que de futures recherches devraient explorer les facteurs culturels, économiques, sociaux ou politiques sous-jacents aux résultats observés dans notre étude.

Nous constatons que la saisonnalité, en particulier les températures plus élevées, affecte la consommation d'eau potable dans les deux types d'infrastructures. Ce résultat est cohérent avec d'autres études menées en Afrique subsaharienne indiquant que pendant les saisons sèches et les sécheresses, lorsque la disponibilité de l'eau de surface est réduite, la demande en eau augmente (MacAllister et al., 2020; Thomas et al., 2019; 2020). Mettre en lumière ces variations saisonnières de la demande, qui ne sont souvent pas capturées dans les statistiques dérivées des enquêtes ménagères (Elliott et al., 2019), est important pour éclairer les politiques et les pratiques.

Nos résultats montrent qu'une augmentation de 1 °C de la température moyenne mensuelle est associée à une augmentation estimée de plus de 350 litres d'eau par point d'eau par jour. Bien qu'il s'agisse d'une estimation sujette à incertitude, des pics dynamiques et soutenus de la demande en eau risquent de mettre les infrastructures à capacité de production limitée, telles que les pompes manuelles, sous une pression supplémentaire. En Afrique rurale, les technologies dominantes, en particulier les pompes manuelles, et les approches de gestion communautaire (Harvey & Reed, 2004; van den Broek & Brown, 2015; Whaley et al., 2019) peinent à faire face aux stress liés au climat, comme l'indiquent les progrès lents pour atteindre l'objectif de développement durable (ODD) 6.1 (UNICEF & WHO, 2022).

Des recherches récentes estiment que respecter l'objectif de 1,5 °C convenu lors de la conférence de Paris de 2015 signifierait néanmoins que près de 200 millions de personnes seraient exposées à des augmentations de température sans précédent (Rockstrom et al., 2023). Des approvisionnements en eau résilients au climat sont essentiels pour s'adapter à ces menaces. L'utilisation de l'énergie solaire pour pomper des ressources en eau souterraine pourrait constituer une réponse d'adaptation efficace, à condition que les ressources soient correctement gérées et surveillées (MacAllister et al., 2020; MacDonald et al., 2021; Meunier et al., 2023; Rodella et al., 2023). Comme notre analyse le révèle, la demande en eau varie considérablement d'un site à l'autre, et les futurs investissements dans des infrastructures pourraient cibler en priorité les endroits sous pression. Avec des investissements en capital dans les infrastructures hydrauliques qui devraient augmenter en Afrique au cours de la prochaine décennie (International High-Level Panel on Water Investments for Africa, 2023), des études pour guider leur allocation et assurer leur efficacité sont essentielles.

Deuxièmement, nos résultats montrent que les kiosques solaires peuvent générer jusqu'à quatre fois plus de revenus par rapport aux pompes manuelles. Cela est dû à des améliorations constantes de recouvrement. L'augmentation considérable des paiements collectés et des revenus générés à court terme dans l'étude suggère une préférence des utilisateurs pour les kiosques solaires qui sont gérés de manière professionnelle. Bien qu'il ne soit pas possible de déterminer pourquoi les Maliens ruraux paient de manière plus fiable pour l'eau potable dans les kiosques solaires, des études empiriques montrent que l'amélioration de la prestation de services en réduisant les coûts de temps liés à la collecte d'eau ou en garantissant une plus grande fiabilité crée de la valeur pour les utilisateurs (Hope et al., 2020; Hope & Ballon, 2021; Van Houtven et al., 2017). Une compréhension empirique supplémentaire des augmentations de revenus observées et des changements dans les comportements de paiement est nécessaire, soulignant un domaine important pour la recherche future.

Notre analyse offre de nouvelles perspectives pour la politique et la pratique sur le rôle des améliorations de services pour débloquer les paiements des utilisateurs, qui sont la principale source d'un modèle de financement durable (Fonseca et al., 2013; Hope et al., 2020). Bien que les investissements en eau de donateurs et de gouvernements aient largement porté sur le financement des coûts d'infrastructure en Afrique rurale, il est de plus en plus urgent de comprendre comment les coûts opérationnels peuvent être intégrés dans ces modèles de financement (Hutton & Varughese, 2016). Le fait qu'en Afrique environ un point d'eau sur quatre est non-fonctionnel à un moment donné (Foster, 2013; Foster et al., 2020) exige une nouvelle approche qui relie plus explicitement les investissements à la prestation de services. Il est crucial de passer d'une réflexion à coût minimal à un modèle plus axé sur la création de valeur pour financer les coûts d'exploitation des services d'eau rurale (Garrick et al., 2017; Hope et al., 2019; 2020). Les kiosques solaires pourraient être une approche prometteuse si leur déploiement constitue une valeur ajoutée pour les usagers, se traduisant par une amélioration des comportements de paiement et des revenus plus élevés, ce qui est fondamental pour garantir des investissements à long terme.

Cependant, les kiosques solaires restent soumis à la demande saisonnière en eau, soulignant la nature dynamique des comportements d'utilisation de l'eau en Afrique rurale (Armstrong et al., 2022; MacAllister et al., 2020; Thomas et al., 2019; Thomson et al., 2019). Comme montré dans cette étude, la demande aux kiosques solaires gérés professionnellement fluctue avec des pics d'utilisation de l'eau et de revenus biaisés vers la saison sèche. Identifier des stratégies pour inciter les populations rurales à utiliser des sources d'eau potable sûres pendant les périodes de pluie générerait non seulement des revenus supplémentaires, mais contribuerait également à réaliser des gains sanitaires associés à la consommation d'eau potable (Prüss-Ustün et al., 2019; WHO et al., 2022).

Fournir de l'eau potable par branchement à domicile ne garantit pas de résoudre les fluctuations de revenus ou de consommation d'eau. (Armstrong et al., 2022; Armstrong, 2022). Les recherches d'Armstrong et al. (2022) indiquent que des périodes de pluie

prolongées peuvent réduire les revenus jusqu'à 30 % par rapport aux périodes sèches, que les approvisionnements soient situés à domicile ou non. Nos résultats révèlent des schémas saisonniers similaires de demande et de revenus pour les pompes manuelles et les kiosques solaires. Il est donc crucial de comprendre comment la conception des tarifs peut soutenir la génération de revenus et promouvoir la durabilité des opérateurs. Par exemple, la mise en place de frais fixes réguliers plutôt que de tarifs volumétriques pourrait être une méthode de paiement plus socialement acceptable (Foster & Hope, 2017) et pourrait inciter les populations rurales à s'appuyer sur des points d'eau améliorés tout au long de l'année. Des recherches futures devraient impliquer des prestataires de services professionnels qui peuvent fournir des données opérationnelles et financières standardisées pour évaluer l'impact de différentes modalités de paiement sur l'utilisation de l'eau et les résultats en matière de revenus (McNicholl et al., 2019).

De plus, des études en Afrique montrent qu'une performance opérationnelle et financière plus élevée peut être atteinte par des modèles de prestation de services professionnels comparés à la gestion communautaire (Foster et al., 2022; Smith et al., 2023). Les opérateurs professionnels ont des incitations à développer une prestation plus efficace pour augmenter leurs revenus. Nos résultats montrent que les kiosques solaires gérés professionnellement enregistrent des paiements d'utilisateurs cohérents tout au long des saisons, se traduisant par des revenus locaux considérablement plus élevés par rapport aux pompes manuelles. Des investissements dans les kiosques solaires pourraient être élargis sous des modèles de prestation de services professionnels, car les communautés n'ont souvent pas les compétences techniques nécessaires pour maintenir de tels systèmes (Rahmani et al., 2024). Cela pourrait contribuer à ce que les infrastructures durent conformément à leur durée de vie attendue, plutôt qu'aux taux d'échec et d'abandon actuels (Foster et al., 2020).

5. Conclusion

Nous avons étudié les effets des améliorations d'infrastructure sur les comportements des usagers d'eau en milieu rural au Mali. Notre étude révèle que les kiosques solaires peuvent générer des revenus mensuels plus élevés que les pompes manuelles, soutenant ainsi les efforts plus larges pour accroître la durabilité de l'eau rurale. Bien que les collectes de paiements constantes suggèrent que les utilisateurs sont plus enclins à payer pour l'eau qu'ils consomment lorsqu'elle est fournie de manière professionnelle via des kiosques solaires, la demande en eau demeure saisonnière, ce qui se traduit par des revenus fluctuants. Ces résultats démontrent l'importance des facteurs environnementaux influençant la demande en eau et soulignent que la technologie n'offre guère des solutions définitives aux comportements dynamiques des utilisateurs d'eau ruraux.

L'amélioration des revenus après la mise à niveau solaire met en avant l'importance d'aligner les investissements avec les préférences des usagers pour financer plus efficacement la prestation de services. Alors que les prestataires de services professionnels deviennent de plus en plus courants en Afrique rurale, il pourrait y avoir une opportunité de tirer parti du potentiel des nouvelles technologies, telles que les kiosques d'eau alimentés par énergie solaire, pour atteindre l'ODD 6.1. Bien que cela implique un changement des pratiques actuelles, cela garantirait que les investissements dans les kiosques solaires offrent une réponse efficace et durable aux défis actuels et futurs.

Enfin, nous soulignons que la taille de l'échantillon de notre étude est limitée, ce qui souligne la nécessité d'étudier davantage les implications des améliorations d'infrastructure sur l'utilisation de l'eau et les comportements de paiement à plus grande échelle. Des échantillons plus larges et des séries temporelles plus longues sont nécessaires pour mieux comprendre le potentiel à long terme et l'applicabilité plus large des kiosques solaires, alors que l'incertitude sur les effets à long terme persiste. Enfin, des études supplémentaires sont nécessaires pour révéler pourquoi les usagers ne changent pas leurs comportements d'utilisation de l'eau malgré le niveau de service amélioré fourni par les kiosques solaires.

Déclaration d'intérêt concurrent

Les auteurs déclarent qu'ils n'ont pas d'intérêts financiers concurrents connus ou de relations personnelles qui auraient pu sembler influencer les travaux rapportés dans cet article.

Disponibilité des données

Les données sous-jacentes à cette étude sont disponibles dans l'article publié et ses [informations complémentaires](#).

Remerciements

Johannes Wagner a reçu un financement du programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne dans le cadre du réseau de formation innovante Marie Skłodowska-Curie NEWAVE – convention de subvention n° 861509. Cet article est un produit du programme REACH, financé par UK Aid du Foreign, Commonwealth and Development Office (FCDO) du Royaume-Uni au profit des pays en développement (Code de programme 201880).

Annexe A. Renseignements à l'appui

Les informations complémentaires comprennent des détails supplémentaires sur la disponibilité des données, les méthodes et les résultats, y compris les tableaux de régression et les graphiques ITS. Les données complémentaires à cet article peuvent être consultées en ligne à l'adresse <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106787>.

References

- Abadie, A., Athey, S., Imbens, G. W., & Wooldridge, J. (2022). *When Should You Adjust Standard Errors for Clustering?* 35.
- Armstrong, A., Dyer, E., Koehler, J., & Hope, R. (2022). Intra-seasonal rainfall and piped water revenue variability in rural Africa. *Global Environmental Change*, 76, Article 102592. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2022.102592>
- Armstrong, A., Hope, R., & Munday, C. (2021). Monitoring socio-climatic interactions to prioritise drinking water interventions in rural Africa. *NPJ Clean Water*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.1038/s41545-021-00102-9>
- Armstrong, A. M. (2022). *Revenue patterns of piped water services in rural Africa* [University of Oxford]. https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:02225c98-0d0c-48ab-81a7-91951eb56281/download_file?file_format=application%2Fpdf&safe_filename=Armstrong_2022_Revenue_patterns_of_piped_water_services_in_rural_Africa
- Best, H., & Wolf, C. (2014). Fixed-Effects Panel Regression. In *Fixed-Effects Panel Regression*. SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.4135/9781446288146>.
- Cameron, C. A., & Miller, D. L. (2015). A practitioner's guide to cluster-robust inference. *Journal of Human Resources*, 50(2), 317–372. <https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317>
- Chandel, S. S., Nagaraju Naik, M., & Chandel, R. (2015). Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1084–1099. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.083>
- Copernicus Climate Change Service. (2019). *ERA5-Land monthly averaged data from 2001 to present* [dataset]. ECMWF. <https://doi.org/10.24381/CDS.68D2BB30>.
- Cunningham, S. (2021). *Causal inference: The mixtape*. Yale University Press. <https://mixtape.scunning.com/index.html>.
- DNH. (2007). *Strat' egie Nationale de D' eveloppement de l'Alimentation en Eau Potable au Mali*. Direction Nationale de l'Hydraulique du Mali.
- Elliott, M., Foster, T., MacDonald, M. C., Harris, A. R., Schwab, K. J., & Hadwen, W. L. (2019). Addressing how multiple household water sources and uses build water resilience and support sustainable development. *NPJ Clean Water*, 2(1), 6. <https://doi.org/10.1038/s41545-019-0031-4>
- Fonseca, C., Smits, S., Kwabena, N., Naafs, A., & Franceys, R. (2013). *Financing capital maintenance of rural water supply systems: Current practices and future options*. 40.
- Foster, T. (2013). Predictors of sustainability for community-managed handpumps in Sub-Saharan Africa: Evidence from Liberia, Sierra Leone, and Uganda. *Environmental Science & Technology*, 47(21), 12037–12046. <https://doi.org/10.1021/es402086n>
- Foster, T. (2017). A critical mass analysis of community-based financing of water services in rural Kenya. *Water Resources and Rural Development*, 10, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.wrr.2017.04.003>
- Foster, T., Furey, S., Banks, B., & Willetts, J. (2020). Functionality of handpump water supplies: A review of data from sub-Saharan Africa and the Asia-Pacific region. *International Journal of Water Resources Development*, 36(5), 855–869. <https://doi.org/10.1080/07900627.2018.1543117>
- Foster, T., & Hope, R. (2017). Evaluating waterpoint sustainability and access implications of revenue collection approaches in rural Kenya. *Water Resources Research*, 53(2), 1473–1490. <https://doi.org/10.1002/2016WR019634>
- Foster, T., Hope, R., Nyaga, C., Koehler, J., Katuva, J., Thomson, P., & Gladstone, N. (2022). *Investing in professionalized maintenance to increase social and economic returns from drinking water infrastructure in rural Kenya* [Policy Brief]. Sustainable WASH Systems Learning Program and REACH Programme.
- Freyaldenhoven, S., Hansen, C., Perez, J. P., & Shapiro, J. M. (2021). *Visualization, Identification, and Estimation in the Linear Panel Event-Study Design*. 47.
- Garrick, D. E., Hall, J. W., Dobson, A., Damania, R., Grafton, R. Q., Hope, R., Hepburn, C., Bark, R., Boltz, F., De Stefano, L., O'Donnell, E., Matthews, N., & Money, A. (2017). Valuing water for sustainable development. *Science*, 358(6366), 1003–1005. <https://doi.org/10.1126/science.aao4942>
- Graham, J. P., Hirai, M., & Kim, S.-S. (2016). An analysis of water collection labor among women and children in 24 Sub-Saharan African countries. *PLoS One*, 11(6), e0155981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155981>
- Harvey, P., & Reed, B. (2004). *Rural water supply in Africa: Building blocks for handpump sustainability*. Water, Engineering and Development Centre, Loughborough University.
- Hope, R., & Ballon, P. (2021). Individual choices and universal rights for drinking water in rural Africa. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(40). <https://doi.org/10.1073/pnas.2105953118>
- Hope, R., Foster, T., Koehler, J., & Thomson, P. (2019). Rural Water Policy in Africa and Asia. In S. J. Dadson (Ed.), *Water science policy and management: A global challenge* (pp. 159–179). John Wiley & Sons Inc.
- Hope, R., Thomson, P., Koehler, J., & Foster, T. (2020). Rethinking the economics of rural water in Africa. *Oxford Review of Economic Policy*, 36(1), 171–190. <https://doi.org/10.1093/oxrep/grz036>
- Howard, G., Calow, R., Macdonald, A., & Bartram, J. (2016). Climate change and water and sanitation: likely impacts and emerging trends for action. *Annual Review of Environment and Resources*, 41(1), 253–276. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085856>
- Hutton, G., & Varughese, M. (2016). *The Costs of Meeting the 2030 Sustainable Development Goal Targets on Drinking Water, Sanitation, and Hygiene*. World Bank, Washington, DC. <https://doi.org/10.1596/K8543>.
- INSTAT, I. N. D. L. S. D. M. (2019). *ENQUETE MODULAIRE ET PERMANENTE AUPRES DES MENAGES (EMOP)*. http://www.instat-mali.org/contenu/eq/ranuuel18_eq.pdf.
- International High-Level Panel on Water Investments for Africa. (2023). *International High-Level Panel on Water Investments in Africa Report: How to Mobilise US\$30 Billion Annually to Achieve Water Security and Sustainable Sanitation in Africa*. African Union Commission, Department of Agriculture, Rural Development, Blue Economy and Environment. [https://aipwater.org/wp-content/uploads/2023/03/How-to-Mobilise-US\\$30-Billion-Annually-to-Achieve-Water-Security-and-Sustainable-Sanitation-in-Africa-New-York-Version-21-March-2023.pdf](https://aipwater.org/wp-content/uploads/2023/03/How-to-Mobilise-US$30-Billion-Annually-to-Achieve-Water-Security-and-Sustainable-Sanitation-in-Africa-New-York-Version-21-March-2023.pdf).
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (P. R. Shukla, J. Skea, A. Slade, R. Al Khourdajie, D. van Diemen, M. McCollum, S. Pathak, P. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, & J. Malley, Eds.). Cambridge University Press.
- Jones, S. (2013). Sharing the recurrent costs of rural water services in four municipalities supported by WaterAid in Mali. *Waterlines*, 32(4), 295–307. <https://doi.org/10.3362/1756-3488.2013.031>
- Jury, W. A., & Vaux, H. (2005). The role of science in solving the world's emerging water problems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(44), 15715–15720. <https://doi.org/10.1073/pnas.0506467102>
- Katuva, J., Goodall, S., Harvey, P. A., Hope, R., & Trevett, A. (2016). *FundiFix: Exploring a New Model for Maintenance of Rural Water Supplies*.
- Kiprono, A. W., & Llarío, A. I. (2020). *Solar pumping for water supply: Harnessing solar power in humanitarian and development contexts*. Practical Action Publishing Ltd.
- Koehler, J., Nyaga, C., Hope, R., Kiamba, P., Gladstone, N., Thomas, M., Mumba, A., & Trevett, A. (2022). Water policy, politics, and practice: The case of Kitui County, Kenya. *Frontiers in Water*, 13. <https://doi.org/10.3389/frwa.2022.1022730>
- Koehler, J., Thomson, P., Goodall, S., Katuva, J., & Hope, R. (2021). Institutional pluralism and water user behavior in rural Africa. *World Development*, 140, Article 105231. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.105231>
- Kontopantelis, E., Doran, T., Springate, D. A., Buchan, I., & Reeves, D. (2015). Regression based quasi-experimental approach when randomisation is not an option: Interrupted time series analysis. *BMJ*, 350(jun09 5), h2750. <https://doi.org/10.1136/bmj.h2750>
- Linden, A. (2015). Conducting interrupted time-series analysis for single- and multiple-group comparisons. *The Stata Journal: Promoting Communications on Statistics and Stata*, 15(2), 480–500. <https://doi.org/10.1177/1536867X1501500208>
- Lopez Bernal, J., Cummins, S., & Gasparrini, A. (2016). Interrupted time series regression for the evaluation of public health interventions: A tutorial. *International Journal of Epidemiology*, dyw098. <https://doi.org/10.1093/ije/dyw098>
- MacAllister, D. J., MacDonald, A. M., Kebede, S., Godfrey, S., & Calow, R. (2020). Comparative performance of rural water supplies during drought. *Nature Communications*, 11(1), 1099. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14839-3>
- Macdonald, A. M., Calow, R. C., Macdonald, D. M. J., Darling, W. G., & Dochartaigh, B. E. O. (2009). What impact will climate change have on rural groundwater supplies in Africa? *Hydrological Sciences Journal*, 54(4), 690–703. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.4.690>
- MacDonald, A. M., Lark, R. M., Taylor, R. G., Abiyi, T., Fallas, H. C., Favreau, G., Goni, I. B., Kebede, S., Scanlon, B., Sorensen, J. P. R., Tijani, M., Upton, K. A., & West, C. (2021). Mapping groundwater recharge in Africa from ground observations

- and implications for water security. *Environmental Research Letters*, 16(3), Article 034012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abd661>
- Maidment, R. I., Grimes, D., Allan, R. P., Tarnavsky, E., Stringer, M., Hewison, T., Roebeling, R., & Black, E. (2014). The 30 year TAMSAT African rainfall climatology and time series (TARCAT) data set. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(18). <https://doi.org/10.1002/2014JD021927>
- Maidment, R. I., Grimes, D., Black, E., Tarnavsky, E., Young, M., Greatrex, H., Allan, R. P., Stein, T., Nkonde, E., Senkunda, S., & Alcantara, E. M. U. (2017). A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. *Scientific Data*, 4(1), Article 170063. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.63>
- McNicholl, D., Hope, R., Money, A., Lane, A., Armstrong, A., van der Wilk, N., Dupuis, M., Harvey, A., Nyaga, C., Favre, D., Allen, J., Katuva, J., Barbotte, T., Buhungiro, E., Thomson, P., & Koehler, J. (2019). *Performance-based funding for reliable rural water services in Africa* (Working Paper 1). Uptime consortium. <https://www.smithschool.ox.ac.uk/research/water/report-performance-based-funding.html>.
- Meunier, S., Kitanidis, P. K., Cordier, A., & MacDonald, A. M. (2023). Aquifer conditions, not irradiance determine the potential of photovoltaic energy for groundwater pumping across Africa. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 52. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00695-8>
- Mu, X., Whittington, D., & Briscoe, J. (1990). Modeling village water demand behavior: A discrete choice approach. *Water Resources Research*, 26(4), 521–529. <https://doi.org/10.1029/WR026i004p00521>
- Nilsson, K., Hope, R., McNicholl, D., Nowicki, S., & Charles, K. (2021). *Global prospects to deliver safe drinking water services for 100 million rural people by 2030* (REACH Working Paper 12; p. 68). University of Oxford and RWSN. https://reachwater.org.uk/wp-content/uploads/2021/10/100m_REACH_RWSN_Diagnostic-Report.pdf.
- Penfold, R. B., & Zhang, F. (2013). Use of interrupted time series analysis in evaluating health care quality improvements. *Academic Pediatrics*, 13(6), S38–S44. <https://doi.org/10.1016/j.acap.2013.08.002>
- Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Bartram, J., Clasen, T., Cumming, O., Freeman, M. C., Gordon, B., Hunter, P. R., Medicott, K., & Johnston, R. (2019). Burden of disease from inadequate water, sanitation and hygiene for selected adverse health outcomes: An updated analysis with a focus on low- and middle-income countries. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 222(5), 765–777. <https://doi.org/10.1016/j.ijheh.2019.05.004>
- Rahmani, S., Murayama, T., Nishikizawa, S., & Suwanteep, K. (2024). Assessing the post-construction support for solar water-pumping systems in rural communities in Indonesia. *Environment, Development and Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04981-z>
- Rockstrom, J., Gupta, J., Qin, D., Lade, S. J., Abrams, J. F., Andersen, L. S., Armstrong McKay, D. I., Bai, X., Bala, G., Bunn, S. E., Ciobanu, D., DeClerck, F., Ebi, K., Gifford, L., Gordon, C., Hasan, S., Kanie, N., Lenton, T. M., Loriani, S., & Zhang, X. (2023). Safe and just Earth system boundaries. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06083-8>
- Rodella, A.-S., Zaveri, E., & Bertone, F. (2023). *The Hidden Wealth of Nations: The Economics of Groundwater in Times of Climate change*. World Bank. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/099257006142358468/pdf/IDU0fb2550de013100434708d920a3e3bec6afb1.pdf>.
- Schochet, P. Z. (2022). Statistical power for estimating treatment effects using difference-in-differences and comparative interrupted time series estimators with variation in treatment timing. *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 47(4), 367–405. <https://doi.org/10.3102/10769986211070625>
- Smith, D. W., Atwii Ongom, S., & Davis, J. (2023). Does professionalizing maintenance unlock demand for more reliable water supply? Experimental evidence from rural Uganda. *World Development*, 161, Article 106094. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2022.106094>
- Tarnavsky, E., Grimes, D., Maidment, R., Black, E., Allan, R. P., Stringer, M., Chadwick, R., & Kayitakire, F. (2014). Extension of the TAMSAT satellite-based rainfall monitoring over Africa and from 1983 to present. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53(12), 2805–2822. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0016.1>
- Thomas, E., Jordan, E., Linden, K., Mogesse, B., Hailu, T., Jirma, H., Thomson, P., Koehler, J., & Collins, G. (2020). Reducing drought emergencies in the Horn of Africa. *Science of The Total Environment*, 727, Article 138772. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138772>
- Thomas, E., Needoba, J., Kaberia, D., Butterworth, J., Adams, E. C., Oduor, P., Macharia, D., Mitheu, F., Mugo, R., & Nagel, C. (2019). Quantifying increased groundwater demand from prolonged drought in the East African Rift Valley. *Science of The Total Environment*, 666, 1265–1272. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.206>
- Thompson, J., Porras, I., Tumwine, J., Mujwahuji, M., Katui-Katua, M., Johnstone, N., & Wood, L. (2001). *Drawers of water II: 30 years of change in domestic water use & environmental health in east Africa*. International Institute for Environment and Development.
- Thomson, P., Bradley, D., Katilu, A., Katuva, J., Lanzoni, M., Koehler, J., & Hope, R. (2019). Rainfall and groundwater use in rural Kenya. *Science of The Total Environment*, 649, 722–730. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.330>
- UDUMA. (2017). *UDUMA Project Proposal—Sustainable Water Services for Rural Mali*.
- UNEP. (2022). *Adaptation Gap Report 2022: Too Little, Too Slow – Climate adaptation failure puts world at risk* (p. 84). United Nations Environment Programme. www.unep.org/adaptation-gap-report-2022.
- UNGA. (2015). *Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development (A/RES/70/1)*. United Nations. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N15/291/89/PDF/N1529189.pdf?OpenElement>.
- UNICEF, & WHO. (2022). *Progress on drinking water, sanitation and hygiene in Africa 2000–2020: Five years into the SDGs*. United Nations Children's Fund (UNICEF). <https://washdata.org/sites/default/files/2022-03/jmp-2022-regional-snapshot-Africa.pdf>.
- van den Broek, M., & Brown, J. (2015). Blueprint for breakdown? Community based management of rural groundwater in Uganda. *Geoforum*, 67, 51–63. <https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2015.10.009>
- van der Wilk, N. (2019). *Conditions for private sector involvement and financing in the rural water sector*. All systems go! WASH systems symposium, The Hague, Netherlands.
- Van Houtven, G. L., Pattanayak, S. K., Usmani, F., & Yang, J.-C. (2017). What are households willing to pay for improved water access? Results from a meta-analysis. *Ecological Economics*, 136, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.01.023>
- Whaley, L., MacAllister, D. J., Bonsor, H., Mwachungu, E., Banda, S., Katusiime, F., Tadesse, Y., Cleaver, F., & MacDonald, A. M. (2019). Evidence, ideology, and the policy of community management in Africa. *Environmental Research Letters*, 12. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab35be>
- White, G. F., Bradley, D. J., & White, A. U. (1972). *Drawers of water: Domestic water use in East Africa*. University of Chicago Press.
- WHO, UNICEF, & World Bank. (2022). *State of the world's drinking water: An urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all*. World Health Organization. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/363704>.
- Wooldridge, J. (2010). *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. 741.
- World Bank. (2018). *Solar Pumping: The Basics*. World Bank, Washington, DC. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/880931517231654485/pdf/123018-WP-P159391-PUBLIC.pdf>.
- World Bank. (2021). *Mali: Understand COVID-19's impacts for better actions* [Text/HTML]. World Bank. <https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/08/11/mali-understand-covid-19-s-impacts-for-better-actions>.
- World Food Programme. (2021). *West Africa: The 2021 Rainy Season in Review*. <https://doocs.wfp.org/api/documents/WFP-0000133543/download/>.